

GENERATION AND CONTROL METHOD OF WORKING TRACK OF ROBOT HAND

Publication number: JP2003280710

Publication date: 2003-10-02

Inventor: SASAKI SHINOBU; HINO RYUTARO

Applicant: JAPAN ATOMIC ENERGY RES INST

Classification:

- international: **B25J9/10; G05B19/4093; B25J9/10; G05B19/4093;**
(IPC1-7): G05B19/4093; B25J9/10

- European:

Application number: JP20020078604 20020320

Priority number(s): JP20020078604 20020320

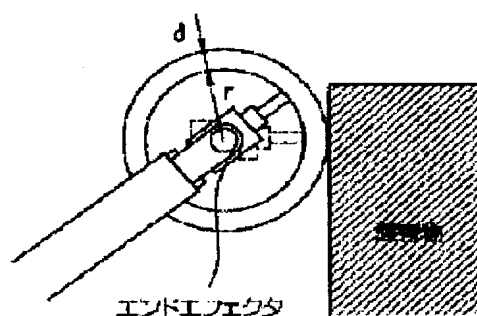
Report a data error here

Abstract of JP2003280710

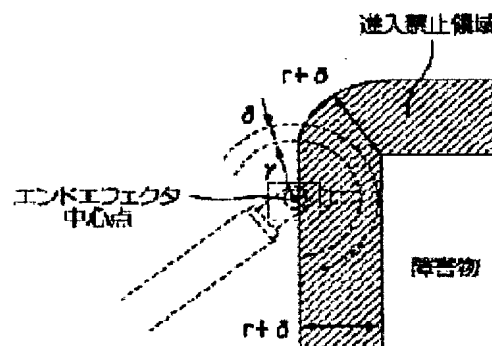
PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a method used for guiding a robot hand from a designated position to a target position in a work environment wherein obstacles having different sizes and shapes from one another are present, capable of remarkably improving a calculation processing time because of not including calculation of a complicated three-dimensional potential field as compared with a conventional method, and of automatically generating a safe working track of the hand without interfering with an object at all.

SOLUTION: This creation and control method of a working track of a universal robot hand is used for creating a world map (environmental map) of the actual world by a model for avoiding the obstacles and a virtual potential in order to determine the spatial working track of the hand (end effector) attached to the tip of a robot arm in a three-dimensional work environment including the obstacles, and for searching for a relay point of a passage in the optimum condition while consulting a potential (movement number) registered in the map.

COPYRIGHT: (C)2004,JPO



(1)



(2)

Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号
特開2003-280710
(P2003-280710A)

(43)公開日 平成15年10月2日(2003.10.2)

(51)Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テームコード*(参考)
G 0 5 B 19/4093		G 0 5 B 19/4093	E 3 C 0 0 7
B 2 5 J 9/10		B 2 5 J 9/10	A 5 H 2 6 9

審査請求 有 請求項の数 4 O L (全 11 頁)

(21)出願番号 特願2002-78604(P2002-78604)

(22)出願日 平成14年3月20日(2002.3.20)

(71)出願人 000004097

日本原子力研究所
千葉県柏市末広町14番1号

(72)発明者 佐々木 忍

茨城県那珂郡東海村白方字白根2番地の4
日本原子力研究所東海研究所内

(72)発明者 日野 竜太郎

茨城県那珂郡東海村白方字白根2番地の4
日本原子力研究所東海研究所内

(74)代理人 100089705

弁理士 社本 一夫 (外5名)

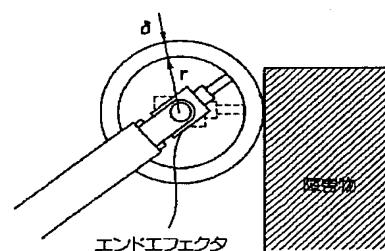
Fターム(参考) 3C007 LS00 LS11 LS15 MS09
5H269 AB33 BB14 CC09

(54)【発明の名称】 ロボットハンドの作業軌道の生成と制御方法

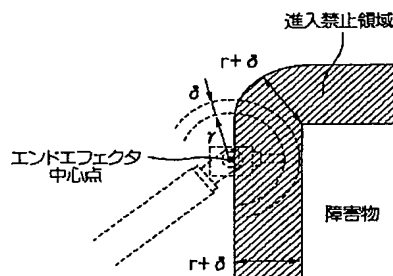
(57)【要約】

【課題】 大きさや形の異なる障害物が存在する作業環境にいて、ロボットハンドを指定位置から目標位置に誘導する方法であって、従来法に比べて煩雑な3次元ポテンシャル場の計算を含まないために計算処理時間が極端に改善され、対象物と全く干渉しない安全なハンドの作業軌道が自動的に生成される。

【解決手段】 障害物を含む3次元の作業環境において、ロボットアームの先端に取り付けたハンド(エンドエフェクタ)の空間上の作業軌跡を決定するために、障害物回避のモデルと仮想的なポテンシャルによる実世界のワールドマップ(環境マップ)を作成し、当該マップに登録されたポテンシャル(移動番号)を参照しながら最適条件で経路の中継点を探索する汎用的な、ロボットハンドの作業軌道の生成と制御方法。



(1)



(2)

【特許請求の範囲】

【請求項1】 障害物を含む3次元の作業環境において、ロボットアームの先端に取り付けたハンド（エンドエフェクタ）の空間上の作業軌跡を決定するために、障害物回避のモデルと仮想的なポテンシャルによる実世界のワールドマップ（環境マップ）を作成し、当該マップに登録されたポテンシャル（移動番号）を参照しながら最適条件で経路の中継点を探索する汎用的な、ロボットハンドの作業軌道の生成と制御方法。

【請求項2】 請求項1を適用する作業環境に障害物とは、異質な特定の制御対象領域が存在する場合、待機ポテンシャルを指定してその領域での移動番号の登録を一時的に中断させる措置を取り入れた環境マップの作成と経路探索から、当該制御領域を回避する機能を備えた、ロボットハンドの作業軌道の生成と制御方法。

【請求項3】 請求項1又は2で誘導されたロボットハンドの作業軌道に対して、直線上の移動を優先させるための中継点の間引き（ジャンプ）操作から、進路変更の少ない最短軌道を再構築する、ロボットハンドの作業軌道の生成と制御方法。

【請求項4】 請求項1、2又は3で誘導された作業軌道上の各点に対応するロボットアームの姿勢（すなわち、リンクとジョイントから構成される連鎖機構の動作）が物理的に実現不可能となる場合に、最適探索アルゴリズムの中に埋もれた実現可能な軌道の候補を活用するロバスト性を特徴とする、ロボットハンドの作業軌道の生成と制御方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、障害物を含む3次元の作業環境において、ロボットハンドの作業軌道を生成、制御する方法に関するものである。

【0002】ロボットマニピュレータを使ってなんらかの作業を行わせるためには、まず、アームの先端に取り付けたエンドエフェクタと称するロボットハンドの指機構を作業開始位置から作業終了位置に誘導する動作軌跡（以下、作業経路、作業軌道あるいは単に経路、軌道とも呼ぶ）を定め、次に、その経路上の位置・姿勢情報からアームの全体姿勢（関節動作）を決定する2つ技術が基本となる。

【0003】それぞれ、軌道計画問題、逆運動学問題と呼ばれ、ハンドやアームを構成するリンク機構が空間を移動中に環境内のさまざまな対象物（以下、障害物と同義）と接触や干渉を起こさないことを念頭において問題解決を図ることが重要である。特に、後者は、関節の自由度や多様な動作形態が関係する中で、ロボットアームの相対運動を直接制御する課題として多角的に研究開発が進められてきた。本発明は、このようなマニピュレータを用いた作業の全工程に対するプランニングの中で、ロボットハンドの指機構の自律的な軌道生成法に関するも

のである。すなわち、種々雑多な対象物を含む環境下で、人間の介入や指示に代わって、ハンドが自ら障害物や特定の領域を回避しながら移動する作業軌道を高速に生成する簡便な計算アルゴリズムに関するものである。

【0004】

【従来の技術】ロボットアームを制御して作業を実行させるとき、プログラムやティーチング（教示）により作業動作の詳細を指定することが一般的である。今日、グラフィック表示機能や、干渉チェック機能を備えたシミュレータを用いてロボット動作を対話的に計画する方法もいろいろと開発されているが、依然として多くの時間と労力が必要である。こうした人間の判断や操作を必要とする段階から、それを少しずつ開放する、いわゆる自律化への技術や経験は着実に蓄積されてきたものの、単なる機械の自動化と異なり、マニピュレーションの1機能を取っても、完全な作業計画の達成に立ちはだかる壁は、対環境への適応能力である。

【0005】人間の手に相当するロボットハンドがある位置から別の位置に移動する動作軌道について、予想される軌道をいくつかの区間に分け、各軌道区間で連続的な時間関数として代数的に取り扱うことは極めて容易であっても、障害物を検出しそれを回避するアプローチは即利用に結びつくものが少なく、障害物の検出・回避問題の困難さが認識されていた。

【0006】特に、その計算の複雑さについて、最悪の場合に計算爆発を起こしかねないと言算幾何学の分野で明らかにされたことを認めつつも、その理論評価は現実のロボットの動作として極めて稀なケースであり、むしろ、実際の動作計画は十分実現可能であるとの立場から研究開発が進められた結果、例えば、環境内の対象物や目標位置からロボットまでの距離に応じた反発力や引力を取り入れたポテンシャル法が障害物との干渉やニアミスを経験せずにロボットの自律誘導に大きく貢献したことは良く知られている。

【0007】この考え方を発展させ、人工ポテンシャル法自体の潜在的弱点を改良したアプローチ、すなわち、熱伝導論や回路論で扱うスカラー状態量をロボット世界の環境情報としてとりまとめ、それをロボットの移動に関連付ける大域的な方法は障害物の存在する環境での行動プランニングに対する有用なツールとなった。しかしながら、その方法はもともと熱伝導楕円方程式を差分化した多元連立方程式や回路網の節点方程式から場の温度や電位分布を決定する過程の計算が必要であることから、それらの状態量を番地登録する3次元的地図化への計算の負担は極めて大きく、開発課題とされた。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】前述したように、ポテンシャル法は温度場や電位場の振る舞いを移動体の平面上の移動と関連付けることで満足な結果を導いたが、マニピュレータのハンドが指定環境下で動作する3次元軌

道計画問題への適用は、計算時間や計算量の急激な増加を来す予想外の不利な面が表面化する。このような経路決定の予備過程に計算努力の大部分を費やす取り組みは3次元の場合必ずしも合理的でなく、3次元空間の移動に有効な環境情報の見直しと簡略化した取り扱いが必要となった。

【0009】

【課題を解決するための手段】本発明は、ロボットハンドの作業軌道の生成と制御とを行う当たり、次の方法にその特徴を有するものである。

【0010】(1) 障害物を含む3次元の作業環境において、ロボットアームの先端に取り付けたハンド（エンドエフェクタ）の空間上の作業軌跡を決定するために、障害物回避のモデルと仮想的なポテンシャルによる実世界のワールドマップ（環境マップ）とを作成し、当該マップに登録されたポテンシャル（移動番号）を参照しながら最適条件でロボットアームの経路の中継点を探索する方法である。

【0011】(2) 上記の方法において、作業環境内に障害物が配置された特定の制御対象領域が存在する場合、待機ポテンシャルを指定してその領域での移動番号の登録を一時的に中断させる措置を取り入れた環境マップを作成し、ロボットハンドの最適経路を探索する際に当該制御対象領域を回避する方法である。

【0012】(3) 誘導されるロボットハンドの作業軌道に対して、直線上の移動を優先させるための中継点の間引き（ジャンプ）操作により、進路変更の少ないロボットハンドの最短軌道を構築する方法である。

【0013】(4) 誘導された作業軌道上の各点に対応するロボットアームの姿勢が物理的に実現不可能となる場合に、最適探索アルゴリズムの中に埋もれた実現可能な軌道の候補を活用する方法である。

【0014】

【発明の実施の形態】1. 仮想的なポテンシャル場を利用した軌道生成のプランニング

本発明は、3次元環境内の移動を簡潔にモデル化する空間地図—すなわち、障害物の回避モデルと仮想的なポテンシャルによる実世界のワールドマップ（以下、環境マップ、ポテンシャルマップとも呼ぶ）—の作成と、そのマップ（地図）を利用してマニピュレータのハンドを目標点へ誘導する探索アルゴリズムの主要な柱から構成される。

【0015】マップを作成する方法は、考察する環境内に、一般的な物理現象とは直接関係のない仮想的なポテンシャル（以下、単にポテンシャルと記す）を下記の原理に従って定義することが基本となる。

【0016】すなわち、このマップには、エンドエフェクタが到達する予定の目標位置Gと出発位置Sの記載の他に、目標点Gの状態量（ポテンシャル）を最小として、そこから四方八方へ遠ざかるほどポテンシャルが増

大するような仮想的な世界が凝縮されていると仮定する。この3次元世界の中に仮に出発位置Sのポテンシャルが定められたとすると、仮定により当然、高いレベルにある出発点Sからポテンシャルのより低い値を示す方向にたどることにより、目標点Gに到達する経路が発見できる。これが上記探索アルゴリズムの基本的な考え方であり、空間的な距離をポテンシャル量で間接的に表現できることから、ポテンシャル値の低い方向へ進路を取ることで移動距離の短い経路の生成が容易となる。

【0017】さらに、障害物や進入禁止領域に対しては、ポテンシャルを設定しないマップを作成することで、移動中にロボットと障害物との衝突が確実に回避できることも利点である。問題はそうしたポテンシャル分布をどのように与えるかであるが、ここでは最も直感的でかつ実用的な環境マップの生成を具体的な例を通して説明する。

【0018】以下、考察環境は計算機の取扱いに適した有限個の格子点からなる離散化空間と定め、各格子点に仮想的な状態量を設定した環境マップを利用してエンドエフェクタの経路を探索する。上記探索アルゴリズムは、本来3次元空間が一般的な適用先であるが、ここではその説明をわかりやすくするために、図1の(1)に示す2次元モデルに置き換えて話を進める。図中の罫目は格子点を意味し、状態量がそこに書き込まれる。取り扱う空間は、周辺の境界壁（図の斜線部分）、ハンドの指機構が衝突せずに移動できる自由空間（図の空白罫目部分）および障害物（図の斜線部分）とに大別され、各格子点はそのいずれかに属する。

【0019】(1) ポテンシャルマップの作成

まず、作業経路の生成に先立ってポテンシャルマップの作成手順について説明する。

【0020】a) 進入禁止領域の設定

図2の(1)及び(2)に示されるように、本発明では、エンドエフェクタの3次元空間での移動方向の多様性を考慮して、球体（エンドエフェクタに外接する半径 r の球）で表現する。また、対象物（障害物）との衝突を避ける計算モデルとして、対象物（障害物）のまわりにエンドエフェクタの進入禁止領域（対象物表面から $r + \delta$ の帯状領域： δ はクリアランス）を設け、計算の境界壁と障害物に適用する。図1の(2)では、この $r + \delta$ を単位格子幅の帯状領域（網目部分：進入禁止領域）と便宜的に定めてある。（衝突回避モデルの詳細は2に示す）。

【0021】b) 目標点Gの隣接格子点に対する仮想的なポテンシャルの設定（ステップ1）

各格子点のポテンシャルを0で初期化した後、自由空間におけるポテンシャルマップの作成を行う。最初に、図1の(3)に示すように、目標点Gのポテンシャル（以下、移動番号とも呼ぶ）を1に設定する。次に、目標点に隣接する格子点（2次元モデルの場合は上下左右の4

方向、3次元モデルの場合は上下左右に前後を加えた6方向に位置する格子点)の属性を調べる。隣接格子点の属性が移動可能な自由空間の構成要素であれば、図1の(3)に示すように、その格子点のポテンシャルとして2を設定する。

【0022】c)ポテンシャルの設定範囲の拡大(ステップ2)

次に、ポテンシャルが2である格子点を検索し、それに隣接する格子点の属性およびポテンシャルを調べる。隣接格子点にポテンシャルの設定が可能であれば図1の(4)に示すように、ポテンシャル3を設定する。このように、ポテンシャルが設定可能な格子点とは、一般に移動可能な自由空間の属性を有し、さらに前ステップまでにポテンシャルが設定されなかった格子点(すなわち、ポテンシャル値が0のまま未登録の格子点)を指す。以下、ステップ3、ステップ4、…とポテンシャルの設定範囲を拡大する。

【0023】d)ポテンシャルマップの作成作業の終了(ステップ10)

上記の逐次操作により、ポテンシャルの設定領域が拡大していくと、いずれ図1の(5)に示すように出発点Sに到達する。図を見ると、ここでのステップ数は10に達しているが、まだ空白の未登録な格子点の存在に気が付く。実際、ポテンシャルの設定範囲をさらに拡大させても、その後に設定されるポテンシャルは、出発点で見られたポテンシャル1より大きな値を扱うことになり、それらは作業経路の構成点に選択される可能性がない。したがって、本発明では、出発点の位置認識がなされると同時にこのマップ作成作業を打ち切り、エンドエフェクタの作業経路の探索に移る。

【0024】(2)作業経路の探索プランニング

ここでは、図1の(5)に示すポテンシャルマップを用いて作業軌道を生成する手順について説明する。

【0025】まず、11と登録された移動番号(ポテンシャル)の中から、出発位置Sを経路の第1点として選択する。次に、第2点の探索は第1点の隣接格子点から選択する。出発点に対する隣接格子点の中には、ポテンシャルが設定されない障害物の進入禁止点である可能性も考えられ、選択候補として高々8点が該当する(通常は3次元モデルのために26点)。この隣接格子点への移動として最適な格子はポテンシャルが最も小さい値の格子点と考え、この場合の作業経路の第2点に選択される隣接格子点は、言うまでもなくポテンシャル値が9の格子点となる。

【0026】次に、選択されたポテンシャル9に対する隣接格子点の中から同様の操作で第3点を探索する。以下、この最適探索操作を繰り返すことで、最終的にポテンシャルの値が1である目標点Gに到達する経路が発見され、それは図1の(6)の反転した移動番号をもつ格子点の集合(11, 9, 8, 7, 6, 4, 3, 2, 1)

である。

【0027】2. 障害物との衝突回避モデル

本発明において、エンドエフェクタはこれに外接する半径 r の球で表現され、この球体の中心が移動する軌跡をエンドエフェクタの作業軌道と定める。エンドエフェクタが障害物と接触しないためには、図2の(1)に示すように、その中心が障害物表面から $r + \delta$ 離れている必要がある。ここで、 δ は衝突回避のためのクリアランスを意味する。

10 【0028】しかしながら、作業経路の探索中、エンドエフェクタが移動する度に障害物との距離を算出していたのでは計算効率が非常に悪い。代わりに、図2の(2)に示すような障害物表面から等方向に保守的拡大を図った $r + \delta$ の帯状部分を進入禁止領域として設定すると、対象物と衝突しないハンドの作業軌道はこれを除く空間の経路探索から導き出される。

【0029】3. 待機ポテンシャルの使用による作業軌道の制御

20 エンドエフェクタの作業軌道の生成において、環境内に存在する障害物との衝突回避が完全に達成されていることは必須条件であるが、本発明ではさらに高温、放射能、粉塵等の危険が伴うスポットやブラント内で十分に余裕を持った移動が困難な局所的な狭降空間に対して、可能な限りそれらを回避することもロボットアームの保護の観点から重要と考え、この問題を取上げる。“可能な限り”とは、環境マップの作成状況によってはその領域を移動せざるを得ないプランニングが与えられることを意味し、障害物のような完全に移動を禁止するモデルとは異なる取り扱いが特徴になる。

30 【0030】経験によればこのような場合、温度場や電位場を表現する方程式の中の熱伝導率や電気伝導率を直接調整することで、想定する場のポテンシャル分布が経路の制御に首尾よくつながった。仮想的なポテンシャル場を環境としてハンドの移動を扱う本発明には、熱伝導率のような有効な制御パラメータは存在しないが、ポテンシャルの広がりや抑制する効果を環境マップの作成時に取り入れて、指定領域を回避する経路の発見を試みる。

40 【0031】そこで、制御対象となる指定区域でのマップの作成作業に対して、ある着目格子点からその隣接格子点への移動は、ある条件が満たされるまでそこで一時的に待機すると仮定する。つまり、隣接格子点の移動番号の設定はしばらく中断されるが、その間に指定の制御領域を除く自由空間では、通例のごとく計算開始から隣接格子点に次々と移動番号の登録が続き、ステップが進む。ここでは、先への移動を中断する場合、足踏みを継続する回数に等しい状態量を待機ポテンシャルと名づけて計算入力指定して、足踏みを開始する時点の着目格子点のポテンシャルにこの入力指定値(待機ポテンシャル)を加算した状態量(ポテンシャル)が環境マップの

作成ステップ数に一致したとき、制御領域の隣接格子点にこの状態量が割り当てられるとする。

【0032】例えば、待機ポテンシャルを5に設定した領域では、現在位置でのポテンシャルが登録されてから、その隣接格子点のポテンシャルの登録に移るまでに5ステップの足踏みが要求される。この足踏み中に通常の自由空間（待機ポテンシャル1）ではポテンシャルの設定が5倍に広がっており、この制御操作によってハンドの移動経路が特定の制御領域の外に優先的に構築される可能性が生じる。

【0033】以下に、特定の区域に待機ポテンシャルを指定した場合の作業経路の制御効果を図1と同様に、2次元の環境において説明する。図3は、環境内に特定の制御対象領域が存在する場合、待機ポテンシャルによる特別な環境マップの作成と、そのマップを利用して決定された最適な迂回軌道を表す。

【0034】図3の（1）に出発点Sと、目標点Gが表示されている。計算モデルの中央付近の斜線で表示された領域は待機ポテンシャルを5に設定した制御対象領域であり、それ以外の領域は通常の値1が設定された自由空間である。

【0035】次に、ポテンシャルマップの作成は目標点Gを起点として制御対象領域に到るまで図1に示した方法で行う。図3の（2）は、ポテンシャルが3の格子点からその周辺のポテンシャルを設定するステップ3の状態である。通常、着目点のポテンシャルが3であれば、その隣接格子点（○印で記した格子点）のポテンシャルは4となるが、待機ポテンシャルが5と指定された制御対象領域に属する隣接格子点（斜線領域に○印で記した格子点）では、この数値が加算されるために8となる。

【0036】続いて、図3の（3）のステップ4では、ポテンシャルが4の着目格子点に対する隣接格子点のポテンシャルを5と設定している。一方、着目格子点に対する隣接格子点が、制御対象領域に属する場合は、図に示すように、ステップ4の着目格子点のポテンシャル4に待機ポテンシャル5を加算した9が記される。通常、新たにポテンシャルが設定される格子点のポテンシャルが次のステップ番号と一致するため、次のステップの着目格子点になる。

【0037】しかし、制御対象領域では、通常より大きな値（この場合は8）が設定されているために、8と記された格子は次のステップの着目格子点とはならない。この場合、全ステップ数が制御領域における着目格子でのポテンシャルの値と一致するまで、隣接格子のポテンシャルは設定されず待機することになる。しかしこれは原則であって、着目格子点が指定回数の足踏みをした後、はじめて目指す隣接格子点のポテンシャルが確定するとは限らず、周囲のポテンシャル設定状況により待機中であってもポテンシャルがそこに設定される場合が生じる。

【0038】例えば、ステップ4で8と記された格子点はステップ8になったときに、すぐ下の隣接格子点にポテンシャル13を設定すると思われるが、実際は作業ステップ6における格子点の中からこの隣接点へのポテンシャルの設定が先行するために、結果として13ではなく11と設定される。

【0039】以下同様にしてマップを作成するステップを進めると、図3の（4）ではステップ9となり、この時点で着目格子点はポテンシャルが9の格子点である。この移動番号をもつ格子点は、自由空間と制御領域にそれぞれ存在し、前者は隣接格子点に対して10と設定するが、後者はその隣接格子点における値が未設定の場合に限り、待機ポテンシャルを加算した14が斜線部○印で記した2つの格子点に設定される。

【0040】以上のような操作を繰り返し、出発点Sのポテンシャルが図3の（5）のように定められたので、目標点との間のポテンシャルマップの作成作業はこの時点（ステップ11）で終了する。最後に、出発点から最大勾配に沿って探索したハンドの移動経路は、反転した移動番号をもつ系列（12, 10, 8, 7, 6, 5, 3, 2, 1）として図3の（6）に示される。明らかに、特定の制御領域を自動的に迂回する経路の生成が確認される。

【0041】このように、待機ポテンシャルは制御領域を回避する有効な手段と理解された。因みに、作業経路が制御対象領域を通過しなければ目標点に到達できない計算シナリオの場合は、その状況を正しく認識したシミュレーション結果、つまり、制御領域を通過する最適経路が生成されたことから、ハンドの作業経路を構築する過程で制御対象領域は本質的に障害物と異なる性質のものであることが再確認される。

【0042】4. 中継点の間引き操作による作業軌道の再構築

以上、軌道生成アルゴリズムで求めたハンドの作業経路は、複数個の格子点（中継点）から構成されるために、空間的ゆとりがある場合、そのいくつかを削除（ジャンプ）した点列構成は移動のステップ数を減らすと共に、単純な軌跡が得られることが多い。とりわけ、自由空間の格子点上の移動を原則とする現手法は、環境内に配置されたさまざまな障害物の配置の影響を直接受けるために、生成経路の進路が頻繁に変更されやすい欠点がある。ロボットアームの関節部に発生する駆動誤差を小さく抑えるためにも、ハンドが移動する経路は、変動の少ない滑らかな軌道で、単純な直線上の移動が最も望ましい。したがって、生成された経路を下記の手順に従って修正、加工を施し、満足の行く経路の再構築を行う。

【0043】即ち、本発明で生成されるハンドの作業軌道は、複数の格子点（中継点）から構成されるために、中継点のいくつかを間引くことで、望ましい作業経路の再構築が期待される。それを図で説明すると、図7は障

害物が存在しない環境にもかかわらず、移動の途中で進路変更を行わなければ目標点に到達できない簡単な軌道生成例を示したものであるが、中継点の間引き操作アルゴリズムを用いて生成された経路の再構築を行えば、ハンドが移動する経路を最も理想的な直線にすることが可能である。

【0044】そこで、本発明の基本的な考え方を説明するために、仮想ポテンシャル法により生成された移動経路を示した図8（1）の2次元平面上に生成された簡単な作業経路を考える。この図8（1）においては、便宜的にエンドエフェクタ（ロボットハンドの先端に取付けたハンド）半径および衝突を回避するためのクリアランスは0とする。

【0045】最初に、出発点－目標点間を直接移動すると仮定した場合の障害物との干渉判別経路を示した図8（2）に示されるように、出発点Sと目標点Gを直接結ぶ経路を仮定して障害物との衝突状況を調べる。図8（2）では、明かに障害物との干渉が生じていることがわかる。

【0046】この場合、出発点から障害物に干渉せずに移動できる点で最も目標点に近い点の検索経路を示した図8（3）に示すように、元の作業経路上にある格子点の中から、目標点の1つ手前の格子点P₁に着目し、出発点とこの点を結ぶ直線経路を仮定して障害物との干渉を調べる。中継点P₁でも障害物との干渉がある場合には、更に格子点P₂に着目して同様の処理を繰り返す。上記の処理により、障害物との干渉が生じない中継点P₂を見つかることで、1つの直線軌道SP₂が得られる。

【0047】次に、中継点P₂を仮の出発点としてP₂とGとの間で同様の方法により間引き可能な中継点の探索を行う。そこで、障害物に干渉せずに移動できる中継点の発見と経路の再構築経路を示した図8（4）に示すようなジャンプが可能な中継点为目标点となった時点で処理を終了する。

【0048】なお、上に述べた干渉チェックについては、任意の点(x₁, y₁, z₁)と別の点(x₂, y₂, z₂)とを結ぶ直線方程式 $(x - x_1) / (x_2 - x_1) = (y - y_1) / (y_2 - y_1) = (z - z_1) / (z_2 - z_1)$ を利用して、指定障害物（進入禁止領域）Dとの衝突判定を行う。これは、ある間隔で取り込んだ直線上の各点が進入禁止領域Dに帰属するかをテーブルルックで直接調査すればよい。

【0049】このようにして、最初に生成された経路の格子点からそのいくつかの間引き操作（ジャンプ操作）は、進路変更の少ない直線上の移動が優先されるために、移動距離の短縮化も期待される。

【0050】5. 特記事項（ロボットアームのリンクとジョイントからなる連鎖機構）

これまでに、ロボットプログラミングにおけるハンドの作業軌道の確立について言及したが、これは、マニピュレー

タの腕姿勢の決定問題とカップルしてはじめて作業の自律化に意味を持つ。したがって、アームの動作が首尾よく遂行するために、ハンドの軌道計画の設計過程で情報の提供を多重に考慮しておくことは、計画全体が支障なく展開する上で重要である。実際、ロボットアームの動作を決定する際に、関節部に課した厳しい動作条件や作業環境の複雑さ等のために、ハンドの位置・姿勢を満足する腕姿勢が物理的に実現できなくなる状況が発生して、関節解が決定できないことは十分に予想される。そうした事態に遭遇しても当初の計算上の作業計画を断念せずに、すなわち、作業開始位置と終了位置の変更を行わずに生成されたハンドの軌道に関して別の情報に注意を置く。

【0051】既述したように、ハンドの役割は、目標点Gから出発点への仮想的なポテンシャルの分布状態を作成した後、最大勾配で元に戻る最適軌道の生成であった。この出発点に続く隣接点を最小のポテンシャルで一意的に確定する代わりに、ここでは、近傍26点の内、目標点Gに近い9点を除いた候補を取り出して、それぞれ最大勾配で目標位置に向かう点列に着目する。つまり、出発点を起点として目標点に到る軌跡（高々17組）から到達距離の短い順に登録する等の方法で、最適探索法の中に埋もれた実現可能な軌道を発掘することを提案する。言うまでもなく、それらを逆問題の解不能を克服する手段として利用すれば、作業能力の向上や環境への柔軟な適応を目指す知能ロボットの自律性に有用であると考えられる。

【0052】なお、逆運動学問題を取り扱う上で必要なアーム先端の姿勢（向き）については、作業開始点と作業終了点の間で一定方向や、逐次入力で自由に指定することができるが、一般回転変換と内挿技術を利用した汎用的な取扱いによる姿勢データの再検討も上の逆問題解決に役立つであろう。いずれにしても、これらはマニピュレータによる作業の仕方に依存して選択することができ、技術的には全て確立されているから、ここでは言及しない。

【0053】

【実施例】作業の遂行に支障をきたす種々雑多な障害物が存在する3次元環境下において、ロボットアームを指定した位置から別の目標位置に移動しながら、人間の介入やセンサの支援を仮定せずに自律的にその作業を代行させるためには、作業開始位置から終了位置までアームの先端（ハンド）が動作する作業軌跡が完全に決定されていることが必要である。この要求を満たす本発明の実施例として、以下ではロボットハンドが対象物（障害物）と全く接触せずに安全に移動できる作業軌道を計算機シミュレーションにより再現させる。さらに、温度場によるポテンシャル誘導法との計算時間の比較と共に、待機ポテンシャルによる作業軌道の制御や間引き操作による作業軌道の再構築等請求項に記載した特徴をもつ本

発明の有効性を検証する。

【0054】（実施例1）図4の（1）及び（2）に示すような一辺2mの立方体環境を41×41×41の正方格子に分割し、更に、図4の（3）及び（4）に示すように、その中に置かれた簡単な実験装置のメンテナンスを行うロボットハンドの作業開始位置S（350, 1050, 700）（単位mm）と作業終了位置G（1500, 800, 900）を定める。また、図4の（2）は、この環境に制御対象領域（点線で描写）を指定した計算モデルで、図4の（3）及び（4）は制御対象領域 10 を含めた系の諸元を示す。

【0055】さて、図4の（3）及び（4）に示すように、半径245（mm）の球体で模擬したエンドエフェクタがクリアランスを50（mm）と仮定して2点SG間を動作する状況を再現する。上述した障害物回避モデルと仮想的なポテンシャルに基づくロボットハンドの行動世界の環境マップを作成し、最適探索を通して目標位置Gに誘導する所要の軌道を、環境内に特別な制御領域を設定した場合と比較する。

【0056】即ち、図4の（1）は簡単な実験装置を含む環境と球体のハンドの作業開始位置と終了位置を指定した計算モデルであり、図4の（2）は、その（1）の環境に制御対象領域を指定した計算モデルであり、図3の（3）及び（4）は、環境内の実験装置の配置具合や制御領域の諸元を記した計算モデルである。

【0057】図5の（1）と（2）に点線で示した作業軌道は制御対象領域を考慮しない場合の最適なハンドの作業軌跡であり、一方、対応する実線は制御領域に待機ポテンシャルを10と指定した計算例である。また、表1と表2は図5に描いた双方の移動経路の座標と移動距離の比較である。即ち、表1はエンドエフェクタ（ロボットハンド）が移動する作業軌跡を表し、表2は制御対象領域を指定した場合のエンドエフェクタ（ロボットハンド）が移動する軌跡を表す。

【0058】

【表1】

表1

格子点番号			座標 [mm]			移動距離
i	j	k	x	y	z	[mm]
8	22	15	350	1050	700	0
9	22	16	400	1050	750	71
10	22	17	450	1050	800	141
11	22	18	500	1050	850	212
12	22	19	550	1050	900	283
13	22	19	600	1050	900	333
14	22	19	650	1050	900	383
15	22	19	700	1050	900	433
16	22	19	750	1050	900	483
17	22	19	800	1050	900	533
18	22	19	850	1050	900	583
19	22	19	900	1050	900	633
20	22	19	950	1050	900	683
21	22	19	1000	1050	900	733
22	22	19	1050	1050	900	783
23	22	19	1100	1050	900	833
24	22	19	1150	1050	900	883
25	22	19	1200	1050	900	933
26	22	19	1250	1050	900	983
27	22	19	1300	1050	900	1033
28	21	19	1350	1000	900	1104
29	20	19	1400	950	900	1174
30	19	19	1450	900	900	1245
31	18	19	1500	850	900	1316
31	17	19	1500	800	900	1366

【0059】

【表2】

表2

格子点番号			座標 [mm]			移動距離
i	j	k	x	y	z	[mm]
8	22	15	350	1050	700	0
9	21	16	400	1000	750	87
10	20	17	450	950	800	173
11	19	18	500	900	850	260
12	18	19	550	850	900	346
13	17	19	600	800	900	417
14	16	19	650	750	900	488
15	15	19	700	700	900	559
16	14	19	750	650	900	629
17	13	19	800	600	900	700
17	12	19	800	550	900	750
18	11	19	850	500	900	821
19	10	19	900	450	900	891
20	9	19	950	400	900	962
21	8	19	1000	350	900	1033
22	8	19	1050	350	900	1083
23	8	19	1100	350	900	1133
24	8	19	1150	350	900	1183
25	8	19	1200	350	900	1233
26	8	19	1250	350	900	1283
27	8	19	1300	350	900	1333
28	9	19	1350	400	900	1404
29	10	19	1400	450	900	1474
30	11	19	1450	500	900	1545
31	12	19	1500	550	900	1616
31	13	19	1500	600	900	1666
31	14	19	1500	650	900	1716
31	15	19	1500	700	900	1766
31	16	19	1500	750	900	1816
31	17	19	1500	800	900	1866

【0060】図5の点線の軌道は、ポンプやバルブ等が存在する狭い作業区域ではあるが計算上周りの対象物と

干渉せずに首尾よく移動する状況を示している。仮に、ポンプ近辺の局所区域を制御対象領域と考えて、そこを回避する十分に余裕をもった軌道計画を再設計すると、目標位置Gに到達するまでの移動距離は長くなるものの、ハンドの安全な軌道が手前に生成される結果が(図の実線や表により)確認できる。

【0061】即ち、図5の(1)は、制御領域の有無によるエンドエフェクタ(ロボットハンド)の作業軌道の比較の全体図を表し、また、図5の(2)は、制御領域の有無によるエンドエフェクタ(ロボットハンド)の作業軌道の比較(上面図)を表す。点線は待機ポテンシャルを設定しない計算(計算処理時間: 0.0256

[秒]、移動距離: 1366 [mm])を表し、実線は制御領域に待機ポテンシャルを指定した計算(計算処理時間: 0.0363 [秒]、移動距離: 1866 [mm])を表す。

*

表3

間引き操作前の作業軌道							間引き操作後の作業軌道						
格子点番号			座標 [mm]			移動距離	格子点番号			座標 [mm]			移動距離
i	j	k	x	y	z	[mm]	i	j	k	x	y	z	[mm]
9	13	10	400	600	450	0	9	13	10	400	600	450	0
10	14	11	450	650	500	87							
11	15	12	500	700	550	173							
12	16	13	550	750	600	260							
13	17	14	600	800	650	346							
14	18	15	650	850	700	433							
15	19	16	700	900	750	520							
16	20	17	750	950	800	606							
17	21	17	800	1000	800	677							
18	22	17	850	1050	800	748							
19	23	17	900	1100	800	818							
20	23	17	950	1100	800	868							
21	23	17	1000	1100	800	918							
22	23	17	1050	1100	800	968							
23	23	17	1100	1100	800	1018							
24	23	17	1150	1100	800	1068							
25	23	17	1200	1100	800	1118							
26	23	17	1250	1100	800	1168							
27	23	17	1300	1100	800	1218							
28	23	17	1350	1100	800	1268							
29	23	17	1400	1100	800	1318							
30	24	18	1450	1150	850	1405	30	24	18	1450	1150	850	1251
31	25	19	1500	1200	900	1492							
32	26	19	1550	1250	900	1562							
33	27	19	1600	1300	900	1633							
34	28	19	1650	1350	900	1704							
34	29	19	1650	1400	900	1754							
34	30	19	1650	1450	900	1804	34	30	19	1650	1450	900	1615

【0064】即ち、図6の(1)は、最適探索法により誘導されたエンドエフェクタ(ロボットハンド)の作業軌道とその中継点の間引き操作により再構築された作業軌道との比較の全体図を表し、図6の(2)は、最適探索法により誘導されたエンドエフェクタ(ロボットハンド)の作業軌道とその中継点の間引き操作により再構築された作業軌道との比較の上面図を表す。点線は間引き操作を実施しない軌道計算(計算処理時間: 0.0396 [秒]、移動距離: 1804 [mm])を表し、実線は間引き操作を施した軌道計算(計算処理時間: 0.0429 [秒]、移動距離: 1615 [mm])を表す。

【0065】最後に、従来の温度場の計算を通してハン

*【0062】次に、生成された作業軌道に対して、中継点の間引き操作を施す過程の他の計算例を示そう。同じ作業環境下で、出発位置Sと終了位置Gをそれぞれ(400, 600, 450)と(1650, 1450, 900)と定めて導き出されたハンドの移動軌跡は、図6の(1)と(2)の点線で与えられる。一方、間引きアルゴリズムを通して進路変更の少ない軌道に加工した作業経路を図の実線で示す。この中継点の大半が削除され、直線移動を優先する結果は移動距離が約10%短縮されたことが表3から分かる。表3は、間引き操作の有無によるエンドエフェクタ(ロボットハンド)の作業軌跡の比較を表している。このように、間引き操作による作業経路の再構築は元のモデルベースな最適探索経路をさらに短い軌道に加工する有効な方法となる。

【0063】

【表3】

ドの作業経路が算出されるまでの計算処理時間は、空間を分割する格子点の数に大きく依存して変動する傾向がみられたが、本発明では顕著な計算時間の変化を示さず、上述の41×41×41格子分割モデルに対する計算結果は3次元温度場の計算から軌道決定に要した時間と比較すると、概ね数千分の一で処理されることが判明した。このような圧倒的な高速化により、本課題への解決が十分達成されたと評価される。

【0066】

【発明の効果】以上説明したように、大きさや形の異なる障害物が存在する作業環境にいて、ロボットハンドを指定位置から目標位置に誘導するための本発明のアルゴ

リズムは、従来法に比べて煩雑な3次元ポテンシャル場の計算を含まないために計算処理時間が極端に改善され、対象物と全く干渉しない安全なハンドの作業軌道が自動的に生成される。結果はすべてのロボットマニピュレータの作業に適用可能である。

【図面の簡単な説明】

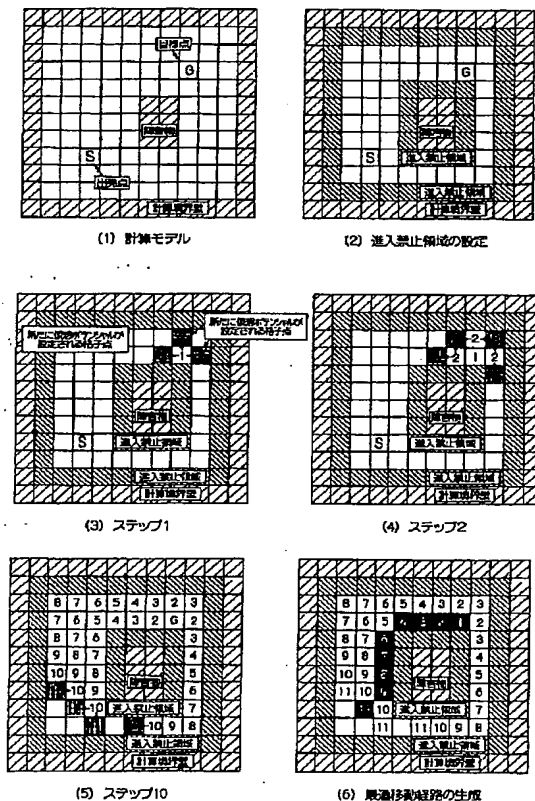
【図1】 2次元環境において、仮想的なポテンシャルマップを段階的に作成する概要と、その環境マップを利用して決定された最適な軌道を表す。

【図2】 (1)はエンドエフェクタ(ロボットハンド)と障害物の衝突回避条件を表し、(2)は障害物の衝突回避条件を表す。

【図3】 環境内に特定の制御対象領域が存在する場合、待機ポテンシャルによる特別な環境マップの作成概要と、そのマップを利用して決定された最適な迂回軌道を表す。

【図4】 (1)は簡単な実験装置を含む環境と球体のハンドの作業開始位置と終了位置を指定した計算モデル*

【図1】



＊を表し、(2)は(1)の環境に制御対象領域を指定した計算モデルを表し、(3)及び(4)は環境内の実験装置の配置具合や制御領域の諸元を記した計算モデルを表す。

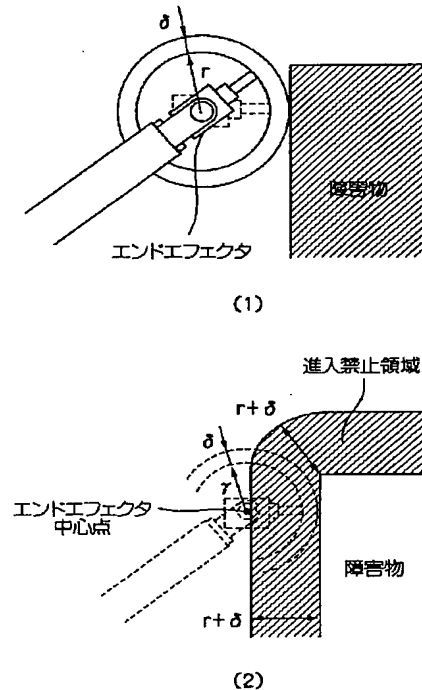
【図5】 (1)は制御領域の有無によるエンドエフェクタ(ロボットハンド)の作業軌道の比較の全体図を表し、(2)は制御領域の有無によるエンドエフェクタ(ロボットハンド)の作業軌道の比較の上面図を表す。

【図6】 (1)は最適探索法により誘導されたエンドエフェクタ(ロボットハンド)の作業軌道とその中継点の間引き操作により再構築された作業軌道との比較の全体図を表し、(2)は最適探索法により誘導されたエンドエフェクタ(ロボットハンド)の作業軌道とその中継点の間引き操作により再構築された作業軌道との比較の上面図を表す。

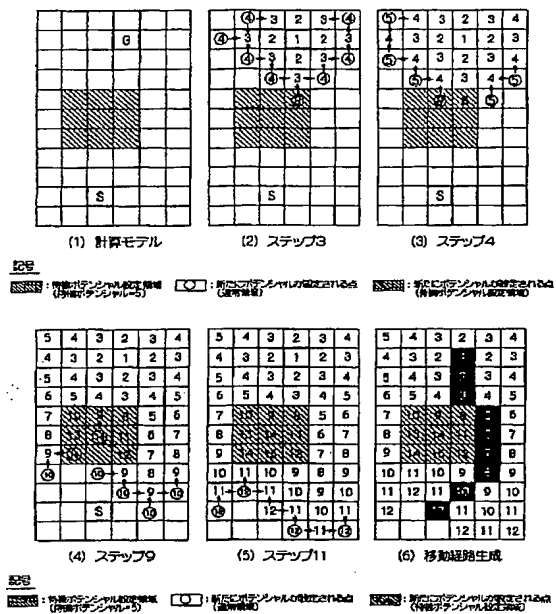
【図7】 進路変更を伴う作業経路を示す図である。

【図8】 間引き操作による作業経路の再構築を表す図である。

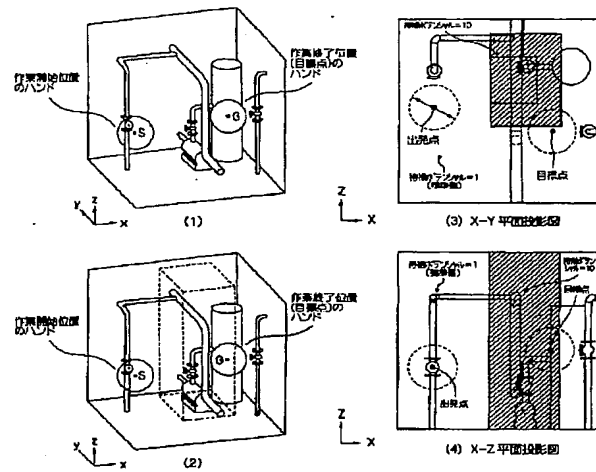
【図2】



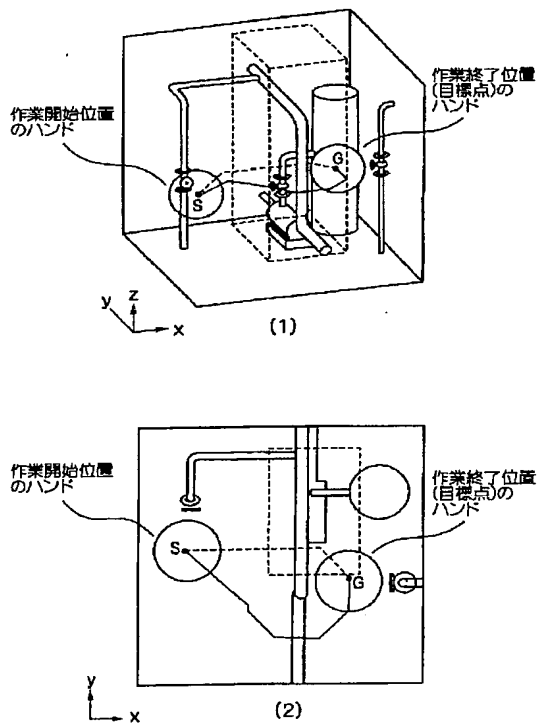
【図3】



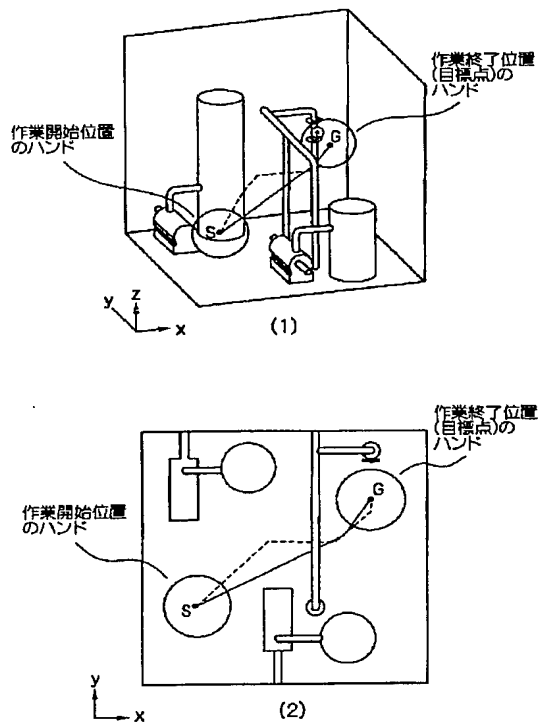
【図4】



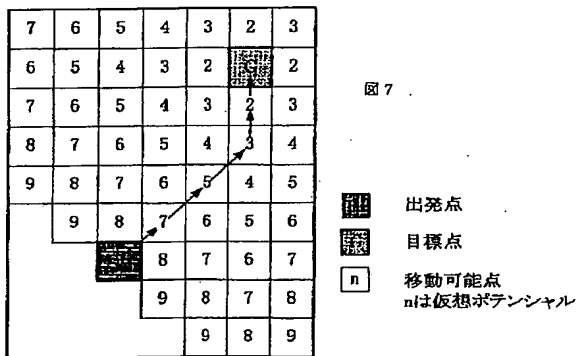
【図5】



【図6】



【図7】



【図8】

図8

